

Počítačové simulace pro návrh klimatizace pavilonu Indonéská džungle Zoo Praha

Design Support Simulations for The Prague Zoo Indonesian Jungle Pavillion

Ing. Martin BARTÁK*

Prof. Ing. František DRKAL, CSc.*

Ing. Miloš LAIN*

Doc. Dr. Ir. Jan L– M. HENSEN**

Príspevek pojednáva o počítačovom modelovaní a simuláciach, ktoré boli provedeny pro podporu návrhu nového pavilonu Indonéská džungle v Zoo Praha. Pavilon bude v zásadě tvořen velkoprostorovou transparentně zastřešenou halou, v níž bude udržováno teplé a vlhké prostředí podobné tropické džungli. K hlavním problémům, které byly řešeny v rámci studie, patřily velké zisky od sluneční radiace v letním období, vysoké tepelné ztráty v zimě, požadované vysoké relativní vlhkosti vnitřního vzduchu a kondenzace vlhkosti na vnitřním povrchu střešní konstrukce.

Klíčová slova: počítačové simulace, ZOO, džungle pavilon, větrání, vytápění, adiabatické chlazení

The paper describes the computer modelling and simulation work that was carried out to support the design of the new Indonesian Jungle pavilion in Prague Zoo. This pavilion will be basically a very large transparent (acrylic) dome maintaining a warm and humid jungle-like indoor environment. Problematic issues include very high solar gains in summer, very high heat losses in winter, requirements for high relative humidity of indoor air, and potential condensation against the roof.

Key word: Computer simulation, ZOO, Jungle pavillion, HVAC system, evaporative cooling

V pražské zoologické zahradě se má vybudovat nový pavilon Indonéská džungle, ve kterém budou umístěny zvířata a rostliny z tropického deštného pralesa, a tomu má odpovídat i vnitřní prostředí pavilonu. Počítačový model tohoto atypického objektu byl využit již v první etapě zpracování projektové dokumentace pro základní dimenzování systému vytápění, větrání a klimatizace. Výstupy simulačních výpočtů byly mimo jiné potřebné chladicí a topné výkony a předpokládané spotřeby energie.

POPIS OBJEKTU

Hlavní částí pavilonu má být hala o objemu více než 14 700 m³ s průsvitnou kopulovitou střešou s povrchem cca 1 900 m². Živočiškové umístění v pavilonu nemají (až na výjimky) k dispozici žádné uzavřené prostory, ve kterých by se udržovaly specifické podmínky. Vnitřní prostředí celé haly by mělo odpovídat tropickému podnebí v oblasti Indonésie. Prostor není rozdělen žádnými stěnami a zvířata (převážně opice) jsou oddělena od návštěvníků pouze vodními plochami.

Požadované vnitřní podmínky byly přibližně stanoveny odborníky zoologické zahrady:

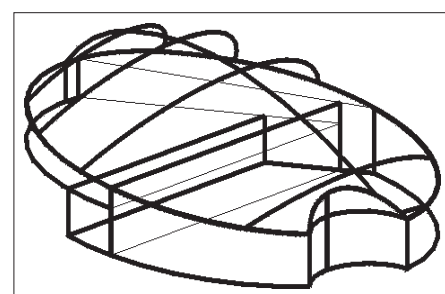
- teplota vzduchu ve dne 22 až 25 °C, relativní vlhkost vzduchu minimálně 70 %;
- povolené krátkodobé extrémní min. teploty vzduchu 18 °C a max. 35 °C;

- noční teploty vzduchu nižší oproti denním o 4 až 6 °C, minimum 18 °C;
- teplota vody v nádržích není regulovaná, tj. je ovlivněna teplotou vnitřního prostředí.

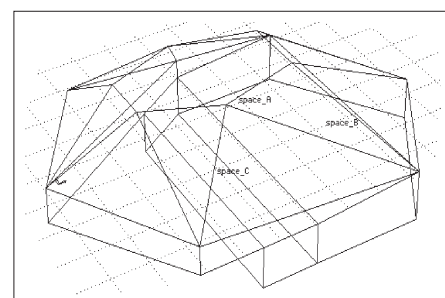
Obvodové stěny budovy a podlahy přiléhající k zemině jsou ze železobetonu tloušťky 30 cm s tepelnou izolací z polystyrenu. Izolační vlastnosti (tepelné odpory) vnějších konstrukcí odpovídají doporučeným hodnotám dle ČSN 73 0540-2. Vnitřní konstrukce jsou ze železobetonu tloušťky 15 cm (stěny) nebo 30 cm (stropy, podlahy) bez tepelné izolace. Objekt bude částečně vnořen do terénu, což napomůže stabilitě vnitřních teplot vzduchu.

Pro transparentní zastřešení modelované budovy byly uvažovány panely Plexiglas SDP 16. Panely jsou tvořeny dvěma rovnoběžnými deskami z akrylátu o tloušťce cca 2 mm, které spojují distanční žebra ze stejného materiálu. Žebra vytvářejí uvnitř panelu podlouhlé komůrky. Celková tloušťka panelu je 16 mm. Pro transparentní konstrukce jsou v dynamických simulacích nutné, kromě hodnot součinitele prostupu tepla, rovněž optické a tepelné vlastnosti v závislosti na úhlu dopadu slunečních paprsků. Úhlová závislost pro součinitele propustnosti a pohltivosti slunečního záření však nebyla k dispozici a bylo nutno ji aproximovat na základě dostupných dat od výrobce (pro kolmý dopad slunečních paprsků) a údajů o podobných transparentních konstrukcích.

ního prostoru a plochy vnějších povrchů. Zakřivené plochy zastřešení a svislých stěn (viz obr. 1) jsou v modelu nahrazeny rovinnými povrchy; například střeška tvořená částí povrchu rotačního elipsoidu byla nahrazena 13 rovinnými plochami. Vnitřní prostor je rozdělen do tří termálních zón, z nichž největší zóny A a B reprezentují velkou halu s rozdílnými teplotami pod střešou a ve spodní části, zóna C představuje speciální prostor pro noční živočichy (tzv. nokturno). Geometrie modelu, jak byla definována v simulačním programu ESP-r, je patrná z obr. 2.



Obr. 1 Tvar budovy zobrazený CAD softwarem



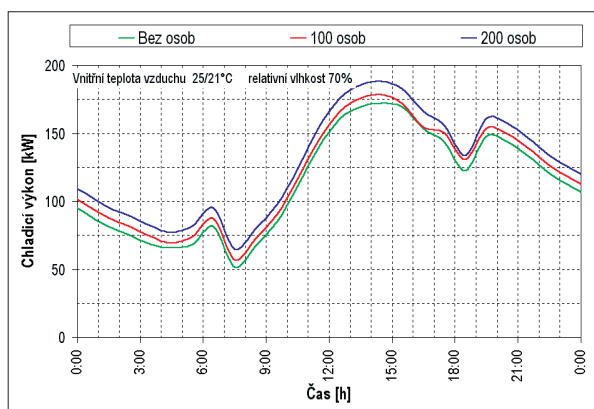
Obr. 2 Tvar modelu definovaného v ESP-r

* ČVUT v Praze, FSI, Ústav techniky prostředí, e-mail lain@fsid.cvut.cz

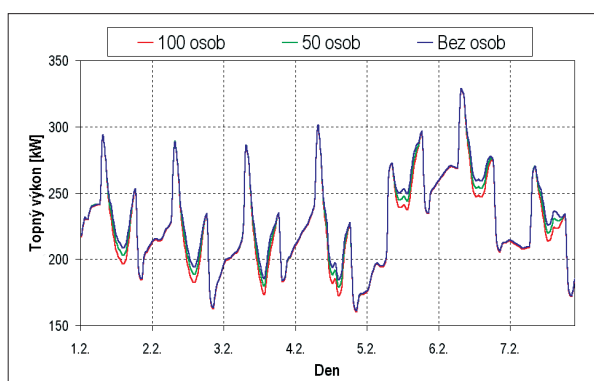
** Knowledge Center Building & Systems TNO – TU/e, Technische Universiteit Eindhoven

MODEL

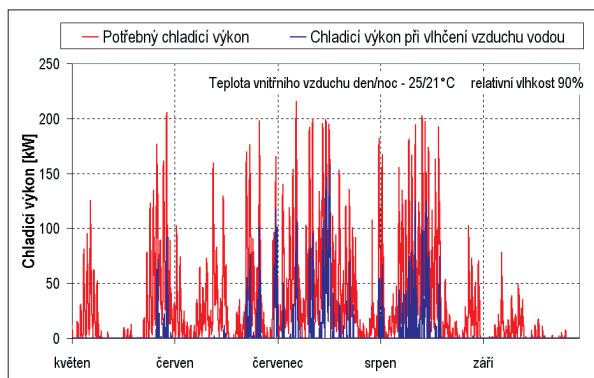
Velikost a tvar modelu jsou dány podobností s reálnou budovou ve smyslu velikosti objemu vnitř-



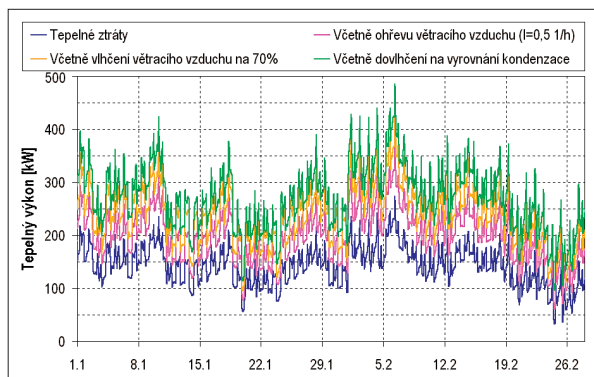
Obr. 3a Citlivost modelu na vnitřní citelné zisky; citelná zátěž objektu během vybraného letního dne při návštěvnosti 0, 100 a 200 osob



Obr. 3b Citlivost modelu na vnitřní citelné zisky; citelné ztráty objektu během vybraného zimního týdne při návštěvnosti 0, 50 a 100 osob



Obr. 4 Snížení tepelné zátěže přímým adiabatickým chlazením.



Obr. 5 Tepelné ztráty objektu prostupem, větráním a vlhčením

V modelu se uvažovaly citelné i latentní zisky od zvířat a návštěvníků. Infiltrace případně větrání čerstvým vzduchem byly podrobně analyzovány, což je popsáno v další části příspěvku. Dále bylo nutné v modelu vystihnout rozložení hmot a tepelných kapacit. Z tohoto hlediska byly důležité vodní nádrže, jejichž vliv na akumulaci tepla byl uvažován.

KALIBRACE MODELU

Kalibrace modelu je velmi důležitým krokem pro zajištění spolehlivosti počítačových simulací. V mnoha případech je však přímá kalibrace (tj. cestou porovnání simulovaných stavů s naměřenými daty v reálné budově) nemožná. To platí především pro nově projektované atypické budovy, jako je zde diskutovaný pavilon zoologické zahrady. Jednou z mála možností, které v takovémto případě zbývají, je porovnání výsledků simulací s hrubými odhady energetických bilancí a stanovení nejméně příznivých provozních a venkovních podmínek (na základě zkušenosti).

Dalším praktickým krokem může být citlivostní analýza, tzn. posouzení citlivosti modelu na změnu určitých parametrů. Například pro model pavilonu byla zjišťována citlivost na vnitřní zisky od osob a živočichů, protože nebylo zcela jasné, kolik návštěvníků se bude v objektu nacházet (počet osob se může snížit i např. pod vlivem zvýšené venkovní tepelné zátěže) a nebyly k dispozici údaje o metabolickém teple exotických živočichů. Jak je patrné z grafů na obr. 3a, 3b, počet osob v objektu má relativně malý vliv na jeho energetickou bilanci a zisky od živočichů, jichž je malý počet, lze zcela zanedbat.

VĚTRÁNÍ ČERSTVÝM VZDUCHEM

Počítačový model byl mimo jiné použit pro odhad optimálních větracích dávek čerstvého vzduchu. Pro zimní období byly posouzeny tři varianty intenzity větrání: 0 h⁻¹,

0,5 h⁻¹ a 1 h⁻¹. Vzhledem k tepelným ztrátám by měla být intenzita větrání co nejmenší. Po uvážení kvality vnitřního ovzduší se jeví jako optimální intenzita větrání 0,5 h⁻¹.

Pro letní období se vyhodnocovalo šest variant výměny vzduchu: 0 h⁻¹, 0,5 h⁻¹, 1 h⁻¹, 2 h⁻¹, 3 h⁻¹ a 4 h⁻¹. Ukázalo se, že zvyšování intenzity větrání snižuje spotřebu energie na chlazení, avšak zvyšuje maximální požadovaný chladicí výkon klimatizace. Jako nejhodnější bylo doporučeno větrání s intenzitou 3 h⁻¹.

PŘÍMÉ CHLAZENÍ ADIABATICKÝM VLNĚNÍM

Pro snížení potřebného chladicího výkonu bylo doporučeno použít vlhčení rozprašováním vody v prostoru. Toto přímé adiabatické chlazení lze využít především vzhledem k vysokým požadovaným relativním vlhkostem vzduchu v pavilónu (v rozsahu od 70 do 90 %).

Jak je patrné z obr. 3, dojde při využití adiabatického chlazení ke snížení maximálního požadovaného chladicího výkonu o cca 25 %. Výrazně se sníží počet hodin provozu chladicího systému, a to z původních 2 000 na 1 000 hodin za rok. Na základě výsledků počítačové simulace lze zpracovat i další analýzy. Například, maximální chladicí výkon je 160 kW, avšak chladicí výkon vyšší než 120 kW je potřeba pouze cca 80 hodin v roce.

Ještě výraznější je efekt adiabatického chlazení na snížení roční spotřeby chladu. Bez adiabatického chlazení je spotřeba chladu pro typické léto cca 89 MWh. Při adiabatickém vlhčení na 70 % se spotřeba chladiva sníží dokonce až na 41 MWh (což představuje snížení o 54 %) a při vlhčení na 90 % je spotřeba pouze 13 MWh (snížení o plných 85 %).

KONDENZACE VODNÍCH PAR

Vzhledem k velmi vysokým vlhkostem vzduchu v pavilónu je velmi pravděpodobná kondenzace vodních par na vnitřní ploše střechy v zimním období. Počítačovou simulací byly určeny povrchové teploty střechy během zimního období. Ty byly následně porovnány s teplotou rosného bodu vzduchu v pavilónu. K množství zkondenzované vody bylo použito analogie mezi přenosem tepla a hmoty (vlhkosti). Pro povrchovou teplotu střechy 5 °C a teplota vnitřního vzduchu 22 °C bylo vypočteno 30 kg/h kondenzátu, což odpovídá výkonu pro dovlhčení 20 kW. Ve skutečnosti však bude kondenzátu méně, neboť teplota povrchu při kondenzaci roste, a tím klesá množství zkondenzované vody.

Při realizaci bylo uvažováno lokální vytápění oblasti u vnitřního povrchu střechy, čímž se kondenzace

vodních par výrazně sníží. Paradoxně při lokálním ohřevu prostoru pod střechou se sice zvýší tepelné ztráty prostupem, ale vzhledem ke snížení kondenzace na vnitřním povrchu dojde k úspoře tepla. Celková spotřeba objektu bude výrazně nižší.

CHOVÁNÍ OBJEKTU PŘI HAVARIJNÍCH STAVECH

Pro zimní i letní období byly simulovány havarijní stavy za extrémně nepříznivých vnějších podmínek. V zimním období byla simulována porucha klimatizace o půlnoci, přičemž se předpokládalo, že dojde k zavření objektu, takže infiltrace venkovním vzduchem by byla minimální ($0,05 \text{ h}^{-1}$). V letním období byla porucha simulována v 8 hodin ráno a předpokládalo se přirozené odvětrávání objektu (intenzita větrání 1 h^{-1}).

Ukázalo se, že v zimním období by měla havárie negativní důsledky hlavně v poklesu teploty, kterému nelze nijak zabránit vzhledem k ztrátám přes střešní konstrukci. V letním období by se dal ještě přijatelný stav vnitřního prostředí udržet přirozeným větráním a dodatečným vlhčením – rozstříkáváním vody v prostoru pavilonu. Průběhy teploty a relativní vlhkosti vnitřního vzduchu v případě havárie jsou ukázány na grafech na obr. 6a, 6b.

NÁVRH KONCEPCE KLIMATIZACE PAVILONU

Na základě výsledků počítačových simulací byl doporučen základní koncept vytápění, větrání a klimatizace pavilonu.

Dispoziční řešení objektu (hlavní prostor pavilonu je zčásti zapuštěn do terénu, objekt je velmi nízký) omezuje podstatně možnosti použití přirozeného větrání. Pro přívod vzduchu by bylo nutné budovat podzemní kanály a pro odvod otevíratelné díly střechy, což je vzhledem k jejímu tvaru krajně obtížné. Kromě toho je nutná úprava přiváděného vzduchu především v zimě. Proto bylo doporučeno použití nuceného větrání. Pro klimatizaci pavilonu doporučujeme použít dvě klimatizační jednotky, každá s průtokem vzduchu cca $24\,000 \text{ m}^3/\text{h}$.

V zimním období bude prostor vytápěn teplotovzdušně, přičemž se doporučuje využití ZTT vzhledem k vysoké entalpii odváděného vzduchu. Množství čerstvého vzduchu bude sníženo a zařízení bude pracovat i se vzduchem oběhovým.

V létě bude využíváno větších průtoků čerstvého vzduchu, který bude adiabaticky vlhčen v jednotce a rovněž v pavilonu. Strojní chlazení bude používáno pouze v krátkém období.

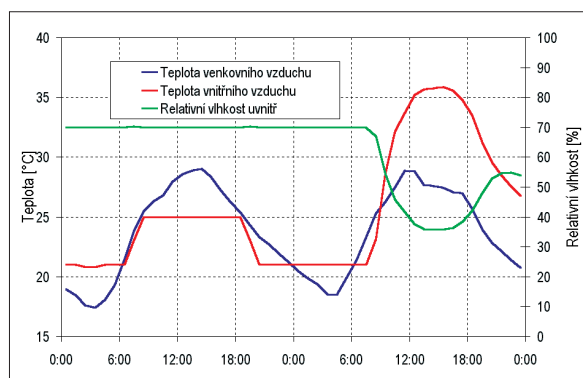
Počítačové simulace této atypické budovy poskytly základní podklady pro návrh systému vytápění,

větrání a klimatizace, jako jsou max. potřebné výkony chlazení, vytápění a zvlhčování. Kromě toho byl posouzen potenciál alternativního chlazení budovy adiabatickým vlhčením v letních měsících a energetická náročnost a potenciál kondenzace vody na vnitřním povrchu střechy. Investorem byly oceněny i simulace průběhu teplot v případě výpadku systému.

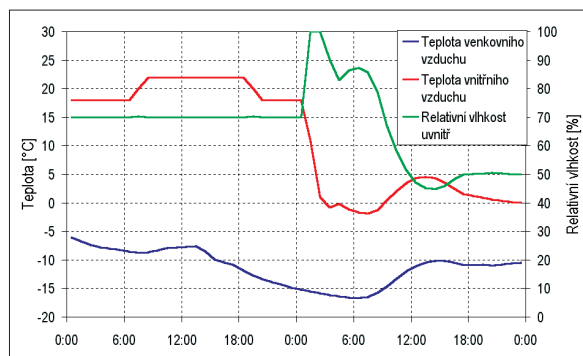
Na tyto simulace zpracované v první fázi projektu by měly navazovat další simulace sloužící zejména pro detailní návrh jednotlivých komponent a optimalizaci provozu systému vytápění, větrání a klimatizace v této budově.

Po dokončení výstavby je možné využít měření na skutečném objektu pro kalibraci modelu a případně i ověření výsledků simulací.

Předneseno na konferenci Building Simulation 2001. Kyoto: IBPSA, 2001, vol. 1, p.841-845. ISBN 85-901939-3-4.



Obr. 6a Vnitřní podmínky po havárii systému v ranních hodinách v letním období



Obr. 6b Vnitřní podmínky po havárii systému v nočních hodinách v zimním období

Tab. 1 Dimenzování systému vytápění, větrání a klimatizace pavilonů

Extrémní venkovní klimatické podmínky			
Teplota vzduchu, léto	30 °C	Teplota vzduchu, zima	-20 °C
Relativní vlhkost vzduchu, léto	50 %	Relativní vlhkost vzduchu, zima	95 %
Entalpie vzduchu	65 kJ/(kgK)		
Intenzita celkové sluneční radiace	800 W/m ²		
Vnitřní klimatické podmínky [°C, %]			
Teplota vzduchu v noci, léto max.	21	Teplota vzduchu v noci, zima min.	18
Teplota vzduchu ve dne, léto max.	25	Teplota vzduchu ve dne, zima min.	22
Relativní vlhkost vzduchu min.	70	Relativní vlhkost vzduchu min.	70
Průtok vzduchu [m ³ /h]			
Venkovní větrací vzduch, léto	48 150	Venkovní větrací vzduch, zima	8 025 m ³ /h
Celkový průtok jednotkou, léto	48 150	Celkový průtok jednotkou, zima	48 150 m ³ /h
Větrání přetlakové		Větrání přetlakové	
Pracovní rozdíl teploty přiváděného vzduchu [K]			
Chlazení v létě	4	Vytápění v zimě	12
Tepelné výkony [kW]			
Tepelný výkon chladiče citelný	100	Tepelný výkon I. předeřhev	62
Přibližný chladičový výkon kompre-sorového zařízení (nutno upřesnit při návrhu akumulace chladu)	30	Tepelný výkon ZTT (70%)	36
		Tepelný výkon II. předeřhev	230
		Tepelný výkon dohřev	200
Spotřeba vody pro vlhčení [kg/h]			
Adiabatické vlhčení v jednotce, léto	125	Adiabatické vlhčení v jednotce, zima	304
Doporučené vlhčení v prostoru	100	Doporučené vlhčení v prostoru	100